

INSTITUT FÜR BAUSTOFFE, MASSIVBAU UND BRANDSCHUTZ  
DER TECHNISCHEN UNIVERSITÄT BRAUNSCHWEIG  
AMTLICHE MATERIALPRÜFANSTALT FÜR DAS BAUWESEN  
DIREKTOREN: PROF. DR.-ING. DR.-ING. E. h. K. KORDINA · PROF. DR.-ING. F. S. ROSTÁSY

**BIBLIOTHEK**  
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz  
der Technischen Universität Braunschweig  
Beethovenstraße 52  
D-3300 Braunschweig

"Untersuchungen von Betonzusatzstoffen  
zur Vermeidung der Alkali-Zuschlag-Reaktion"

vorgelegt von:

Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. K. Kordina  
Dipl.-Min. W. Schwick

Abschlußbericht zum Forschungsvorhaben  
FA 15.025 R 75 des  
Bundesministers für Verkehr

- Kurzfassung -

In den letzten 15 Jahren wurden in Norddeutschland zahlreiche zum Teil gravierende Bauwerksschäden, durch Treiberscheinungen der Alkali-Zuschlag-Reaktion verursacht, bekannt. Zwei Spannbeton-Brückenbauwerke mußten wegen Verlust der Standsicherheit abgerissen werden. Bedingt waren diese Schäden durch die Verwendung opalhaltiger, alkaliempfindlicher Zuschläge und durch den Gehalt an freien Alkalien in den Zementen. Das Forschungsinstitut der Zementindustrie, Düsseldorf, erarbeitete unter Mitwirkung des Instituts für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, Braunschweig, eine Richtlinie, um Schäden aus Alkalireaktion in Zukunft zu vermeiden; damit im Zusammenhang wurden alkaliarme Zemente entwickelt. Aus dem Ausland war bekannt, daß durch Einsatz kieselsäurereicher Betonzusatzstoffe das Alkalitreiben ebenfalls verhindert, zumindest verringert, werden könne; in Düsseldorf und an der RWTH Aachen durchgeführte Versuche zeigten jedoch widersprüchliche oder auch auf die Baupraxis nicht ohne weiteres übertragbare Ergebnisse, da sie an Feinmörtelproben ermittelt wurden.

Da Betonzusatzstoffe häufig als industrielle Abfallprodukte kostengünstig zur Verfügung stehen, sollte versucht werden, mit in Deutschland erhältlichen Zusatzstoffen das Alkalitreiben zu verhindern. Während sich Braunkohleflugasche schon aufgrund ihrer chemisch-mineralogischen Zusammensetzung als problematisch erwies, mit Kieselgur wegen eines extrem gesteigerten Wasseranspruchs keine brauchbaren Betonmischungen erzielen ließen, konnten mit zwei Steinkohlenflugaschen die Treiberscheinungen von rund 1,4 ‰ (nach 260 Tagen) um 85 % bzw. 90 % auf ein zu tolerierendes Endmaß reduziert werden. Hierzu mußten bei einem Beton mit  $420 \text{ kg/m}^3$  PZ 35/F, dessen Zuschlag 5,5 M.-% Opalsandstein enthielt, 20 % bzw. 30 % des Zementes durch Flugasche ersetzt werden. Wurden jedoch nur 10 % des Zementes durch Flugasche ersetzt, ergab sich eine Erhöhung des Treibmaßes von ca. 1,4 ‰ auf 2,7 ‰ nach 260 Tagen. Die Verminderung der Alkali-Treiberscheinungen durch Verwendung von Flugaschen bei Betonen mit alkaliempfindlichen Zuschlägen ist also durchaus möglich, bedarf jedoch sorgfältiger Eignungsprüfungen, um unerwünschte Nebeneffekte zu vermeiden.

## Inhalt

1. Problemstellung
  - 1.1 Betonschäden durch Alkalitreiben in Deutschland
  - 1.2 Vorkommen alkalireaktiver Zuschlagstoffe in Deutschland
  - 1.3 Bisherige Abhilfe gegen Alkali-Reaktion
  - 1.4 Bisherige Erfahrungen mit der Verwendung von Zusatzstoffen
2. Versuchsreihen
  - 2.1 Ausgangsstoffe
    - 2.1.1 Betonzuschlag
    - 2.1.2 Zement
    - 2.1.3 Betonzusatzstoffe
  - 2.2 Betonmischungen
    - 2.2.1 Ermittlung der "pessimalen" Bedingungen
    - 2.2.2 Vorversuche II
    - 2.2.3 "Versuch I" mit erhöhtem Zementgehalt
    - 2.2.4 Nebenversuche
3. Zusammenfassung
4. Literaturverzeichnis

## 1. Problemstellung

### 1.1 Betonschäden durch Alkalitreiben in Deutschland

Schäden an Betonbauwerken infolge der sog. Alkali-Reaktion der Zuschläge sind zumindest seit Ende der 30er Jahre aus der Literatur bekannt; auch im norddeutschen Raum wurden in den letzten Jahrzehnten mehrfach Schäden dieser Art beobachtet: Es handelte sich um den Abbruch der Lachswehr-Brücke in Lübeck; eine Spannbetonbrücke über die Autobahn bei Kaltenkirchen an der Strecke Hamburg - Kiel erlitt derartige Schädigungen, daß die Standsicherheit nicht mehr gewährleistet werden konnte. Eine weitere Brücke im Hamburger Hafengebiet konnte nur mit erheblichem technischen Aufwand vor weiterer Zerstörung bewahrt werden. Aber auch andere Bauwerksarten mußten mit erheblichen finanziellen Mitteln nachträglich, zum Teil kurz nach der Fertigstellung, repariert und saniert werden (z.B. Treppenpodeste an einem Hamburger Einkaufszentrum, Stützen in einem Büro-Hochhaus im Osten Hamburgs).

### 1.2 Vorkommen alkalireaktiver Zuschlagstoffe in Deutschland

Das zunächst wichtigste Problem zur Vermeidung solcher sowohl wirtschaftlich als auch sicherheitsmäßig höchst gravierender Bauschäden lag in der Erkennung alkalireaktiver Zuschlagstoffe. Diese Frage konnte zwischenzeitlich durch die Arbeiten des Zementforschungsinstituts in Düsseldorf zusammen mit dem Institut für Gesteinshüttenkunde der RWTH Aachen, dem Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz Braunschweig und dem Forschungsinstitut für Hochofenschlacke Rheinhausen durch Entwicklung einer brauchbaren Prüfmethode geklärt werden.

Der Hauptschwerpunkt des Auftretens der Alkalireaktion ist Schleswig-Holstein und der nördliche Teil Niedersachsens. Diese regionale Begrenzung ist naturgemäß bedingt durch die Kopplung der Alkalireaktion an das Vorhandensein reaktiver Gesteinsarten im natürlichen Betonzuschlag.

In Norddeutschland sind als alkalireaktive Gesteinsarten bekannt der Feuerstein (Flint) mit seiner porösen, weißen, häufig kalkhaltigen Abart und ein Opalsandstein, speziell die geologische Varietät des glaukonithaltigen sog. Heiligenhafener Gesteins. Während der reaktive Flint aus dem Kalkuntergrund der Kreidezeit stammt, ist der Opalsandstein tertiären Alters. Die reaktionsfähige Kieselsäuresubstanz stammt in beiden Fällen von Schwammnadeln der Kieselschwämme (silici spongia), insofern sind beide Gesteinsarten entwicklungsgeschichtlich miteinander verwandt. Je nach Kalk- bzw. Quarzanteil gibt es demzufolge auch kontinuierliche Übergänge, zu denen Kieselkalke und Kieselmergel oder kieselige Siltgesteine zählen. Die altersmäßige Trennung in Kreide- oder Tertiärzeit ist nur durch Bestimmung eventuell vorhandener Fossilien möglich, wobei die dichten Feuersteinarten eindeutig der Kreidezeit zuzuordnen sind.

Eine weitere Gemeinsamkeit beider Gesteinsarten besteht darin, daß sie während der Eiszeit durch Gletscherbewegungen aus dem Untergrund aufgearbeitet, in südlichere Gebiete transportiert und dort abgelagert wurden. Nach Niemeyer [1] befindet sich ein ausgeprägter Schwerpunkt des Auftretens alkalireaktiver Gesteine im Gebiet nordöstlich einer Linie Lübeck - Neumünster - Schleswig. Diese Linie ist vorwiegend durch die südliche Grenze der letzten Vereisung bestimmt. Aber auch durch Gletschertransporte der älteren Eiszeiten wurde alkalireaktives Material bis nach Niedersachsen verschleppt, bzw. dort aus emporgehobenen Kreidesätteln (Salztektonik) durch Gletscherabrieb herausgearbeitet, wie Schwick [2] nachweisen konnte.

### 1.3 Bisherige Abhilfe gegen Alkali-Reaktion

Das Problem der Alkali-Reaktion war in den USA und Dänemark schon in den vierziger Jahren bekannt. Umfangreiche Arbeiten zu diesem Thema hatten zu der Erkenntnis geführt, daß bei einem maximalen  $\text{Na}_2\text{O}$ -Äqu.-

Gehalt von 0,6 % des Zements ein betonschädigendes Alkalitreiben nicht mehr zu erwarten sei. Sprung [3] konnte zeigen, daß für deutsche Verhältnisse diese 0,6 %-Grenze ebenfalls Gültigkeit hat. Der  $\text{Na}_2\text{O}$ -Äqu.-Gehalt kann bis auf 0,9 M.-% ansteigen, wenn ein Hochofenzement mit einem Hüttensandgehalt von mindestens 50 M.-% gewählt wird, bei einem Hüttensandgehalt von über 65 M.-% darf der  $\text{Na}_2\text{O}$ -Äqu.-Gehalt sogar bis zu 2,0 M.-% ansteigen, ohne daß eine Alkalireaktion zu erwarten ist [3].

#### 1.4 Bisherige Erfahrungen mit der Verwendung von Zusatzstoffen

Die Treiberscheinungen der Alkalireaktion werden durch die Reaktion der im Porenwasser des Betons gelösten Alkalien mit reaktiver Kieselsäure aus dem Betonzuschlag verursacht, indem neu gebildetes Alkalisilikatgel unter Wasseraufnahme aufquillt. Die Bildung quellfähiger Alkalisilikatgele ist an ein kritisches Mengenverhältnis von reaktiver Kieselsäure zu den verfügbaren Alkalien gebunden. In dem Maße, wie dieses kritische Mengenverhältnis durch eine Reduzierung des Alkaliangebotes verändert werden kann und Treiberscheinungen damit vermieden werden - wie im vorigen Kapitel dargelegt wurde -, sollte es möglich sein, durch Zugabe von reaktiver Kieselsäure im Überschuß ebenfalls das Mengenverhältnis von  $\text{SiO}_2$  zu Alkalien aus dem kritischen Bereich zu bringen.

Da die Verwendung von speziell hergestellten alkaliarmen Zementen mit nicht unerheblichen zusätzlichen Kosten verbunden ist, versuchte man schon bald durch Verwendung von latent hydraulischen Betonzusatzstoffen mit hohem Kieselsäuregehalt die schädigenden Auswirkungen der Alkalireaktion zu unterbinden.

Nach Untersuchungen des "Committee on Alkali Reactions in Concrete" am Staatlichen Dänischen Bauforschungsinstitut können Treiberscheinungen neben der Verwendung von alkaliarmen Zementen auch durch Zugabe

von  $\text{SiO}_2$ -reichen Zusatzstoffen vermindert oder vermieden werden [4]. Als solche Zusatzstoffe kommen infrage: Kieselgur, Steinkohlenflugasche, Si-Stoff, Trass und andere Puzzolane (in Dänemark: sog. Modererde).

Die mit Bezug auf die in Dänemark vorhandenen Zuschläge und Zemente gewonnenen Ergebnisse können jedoch nicht auf die in der Bundesrepublik gegebenen anderen Voraussetzungen übertragen werden. Betonversuche am Forschungsinstitut der Zementindustrie erbrachten nur unbefriedigende Ergebnisse. Quelldehnungen konnten durch Einsatz von Flugasche, Hüttensand u.a. nur zu maximal 20 bis 40 % reduziert werden [3]. Ein etwas günstigeres Ergebnis lieferten Versuche an Feinmörtelprismen, von denen Ludwig [5] berichtete.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es nachzuweisen, ob und in welchem Ausmaß die Treiberscheinungen an Normalbetonen infolge Alkalireaktion durch Einsatz von Betonzusatzstoffen verhindert werden können. Dabei sollen weder praxisfremde Sieblinien noch labormäßige Spezialbetone verwendet werden, um eine Übertragbarkeit der Ergebnisse auf die Bedingungen der Baupraxis nicht in Frage zu stellen.

## 2. Versuchsreihen

### 2.1 Ausgangsstoffe

#### 2.1.1 Betonzuschlag

Als Betonzuschlag wurde als inertes, d.h. chemisch nicht reaktionsfähiges Material Okerkies verwendet. Dieser Zuschlag sollte dann für die verschiedenen Versuchsreihen mit einem hoch reaktiven Opalsandstein zu unterschiedlichen Konzentrationen versetzt werden. Dieser Opalsandstein wurde durch Handverlesen aus der Grube Bültwiesch bei

Ivendorf, nördlich Lübeck, gewonnen. Das Gestein dieser Kiesgrube war als Ursache für Bauwerksschäden (Lachwehr-Brücke, Lübeck) und aus Voruntersuchungen hinreichend bekannt. Auch röntgenografische und polarisationsmikroskopische Untersuchungen bestätigten den hohen Gehalt an reaktivem Opal.

Die Alkalireaktivität der Zuschläge wurde gemäß der vorläufigen Richtlinie "Vorbeugende Maßnahmen gegen schädigende Alkalireaktion im Beton", Fassung Februar 1974, überprüft, die Ergebnisse sind in Tabelle 1 wiedergegeben.

Tabelle 1: Alkaliempfindlichkeit der Betonzuschläge

Probe	Okerkies				Ivendorf			reiner Opalsandstein
Prüfkorngruppe (mm)	1 - 2	2 - 4	4 - 8	8 - 16	1 - 2	2 - 4	4 - 8	4 - 8
Flintgehalt (M.-%)			5,7	9,0			9,8	
Gehalt an Opalsandstein u.ä. (M.-%)			9,7	14,1			33,9	100,0
Gewichtsverlust nach NaOH-Test (M.-%)	0,1	0,5	2,2	2,0	1,5	4,6	11,5	95,0
Flintrohddichte (g/cm <sup>3</sup> )			2,327	2,507			2,468	
Anteil reaktiver Flint (M.-%)			2,3	1,2			1,8	



Die Ergebnisse dieser Untersuchungen zeigen, daß die Überprüfung von Betonzuschlägen gemäß der vorläufigen Richtlinie ohne petrografische Kontrolluntersuchungen nicht sinnvoll ist. Der Okerkies ist trotz der kritischen Werte für den Gewichtsverlust nach dem NaOH-Test mit über 0,5 M.-% als unbedenklich zu bezeichnen, da diese hohen Gewichtsverluste durch Zerfallen von angewitterten, aber opalfreien Sandsteinen während des Kochens in Natronlauge nach dem Richtlinientest verursacht wurden. Der Feuerstein entstammt den bei der Heraushebung des Harzes am Nordrand mit angekippten Kreideschichten und wurde durch Flußerosion der Harzflüsse freigelegt. Er kommt nicht in kritischen Konzentrationen vor.

Der Zuschlag der Grube Bültwiesch bei Ivendorf ist eindeutig als "bedenklich" im Sinne der Richtlinie zu bezeichnen. Der Gewichtsverlust nach dem NaOH-Test von 95 M.-% des reinen Opalsandsteins zeigt, daß nach einer gewissen petrografischen Schulung der Opalsandstein sehr gut nach Augenschein erkannt werden kann.

### 2.1.2 Zement

Als Zement wurde für alle Versuchsreihen ein Portlandzement PZ 350 F der Zementwerke Schwenk, Karlstadt/Main verwendet. Dieser Zement hatte einen ausreichend hohen Gehalt an wirksamen Alkalien:

$\text{Na}_2\text{O}$	1,45	M.-%
$\text{K}_2\text{O}$	0,19	M.-%
$\text{Na}_2\text{O}$ -Äqu.	1,15	M.-%

### 2.1.3 Betonzusatzstoffe

Fünf Sorten von  $\text{SiO}_2$ -reichen Betonzusatzstoffen standen zur Auswahl: drei Steinkohlenflugaschen, eine Braunkohlenflugasche und Kieselgur. Die chemische Zusammensetzung der Zusatzstoffe ist in Tabelle 2 wiedergegeben.

Tabelle 2: Chemische Zusammensetzung der Ausgangsstoffe

	Kieselgur 1140	BFA Offleben	SFA HIB	SFA Veltheim	SFA EFA
SiO <sub>2</sub>	89,27	66,2	48,57	49,07	49,67
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,52	2,6	6,60	9,78	8,16
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,09	12,0	28,63	28,90	25,34
CaO	0,29	12,4	2,66	2,68	5,88
MgO	0,13	1,5	2,02	1,72	2,87
K <sub>2</sub> O	0,48	0,8	3,40	1,35	4,21
Na <sub>2</sub> O	0,09	0,2	7,0	0,85	1,03
Glüh- verlust	2,22	0,2	2,20	3,15	2,14
SO <sub>3</sub>	0,18	2,7	0,45	0,29	0,22

BFA = Braunkohlenflugasche

SFA = Steinkohlenflugasche

Die Braunkohlenflugasche erschien nach der chemischen und mineralogischen Analyse als Betonzusatzstoff für den vorgesehenen Zweck nicht geeignet. Ein hoher kristalliner Quarzanteil zusammen mit dem Auftreten von Anhydrit läßt einmal eine latent hydraulische Wirksamkeit vermissen, zum anderen könnte durch die Sulfatzufuhr das Abbindeverhalten des Zements gestört werden.

Von den Steinkohlenflugaschen schied eine Sorte aufgrund eines außerordentlich hohen Alkaligehaltes aus den weiteren Versuchen aus. Bei so hohem Alkaligehalt besteht die Möglichkeit, daß das  $\text{SiO}_2$  : Alkali-Verhältnis nicht ausreichend aus dem pessimalen Bereich verschoben wird. Außerdem ist diese ausgeschiedene Flugasche relativ grobkörnig, so daß eine mögliche puzzolanische Wirksamkeit erst sehr langsam zur Geltung käme. Die zwei anderen Flugaschen "EFA" und "Velt-heim" mit ausreichend hohem Glasanteil und hohem  $\text{SiO}_2$ -Gehalt wurden für die weiteren Versuche ausgewählt.

Die beiden zur Verfügung stehenden Kieselgurarten unterscheiden sich im wesentlichen durch  $\text{SiO}_2$ -Gehalt und Feinheit; eine mit dem höheren  $\text{SiO}_2$ -Gehalt (90 %) und einem Anteil der Körnung  $< 63 \mu\text{m}$  von 47 % wurde für die weiteren Versuche verwendet.

## 2.2 Betonmischungen

### 2.2.1 Ermittlung der "pessimalen" Bedingungen

Zur Ermittlung des "pessimalen" Verhältnisses von reaktiver Kieselsäure im Zuschlag und dem Alkaliangebot aus dem Zement im Hinblick auf größtmögliche Treiberscheinungen wurden Betonmischungen mit Okerkies und einem Gehalt von 0 %, 5 % und 10 % handverlesenem Opalsandstein erstellt. Für die Betongrundmischung (in Abb. 2 mit "Null.Vers." bezeichnet) wurden pro  $\text{m}^3$  verwendet:

380 kg	PZ 350 F, Fa. Schwenk	
171 kg	Wasser (W/Z-Wert = 0,45)	
740 kg	0/2	} Okerkies
185 kg	2/4	
466 kg	4/8	
466 kg	8/16	

Außerdem wurde eine weitere Betonmischung nur mit Kies der Grube Bültwiesch/Ivendorf bei Travemünde angesetzt. Von diesen Betonmischungen wurden je 3 Zylinder mit einem Durchmesser von 15 cm und einer Höhe von 35 cm und je 3 Würfel mit einer Kantenlänge von 10 cm hergestellt.

Die Probezylinder wurden verschiedenen Feuchtigkeitsbeanspruchungen ausgesetzt

- a) im Nebelraum, > 95 % rel. Luftfeuchtigkeit, 25° C
- b) flach im Wasserbecken liegend, aber nur 2 - 3 cm ins Wasser eintauchend, Normklima
- c) vertikal in ca. 1 cm tiefem Wasser stehend (Fußbadlagerung), Normklima

Bild 1 zeigt die horizontale Wasserlagerung der Probekörper.

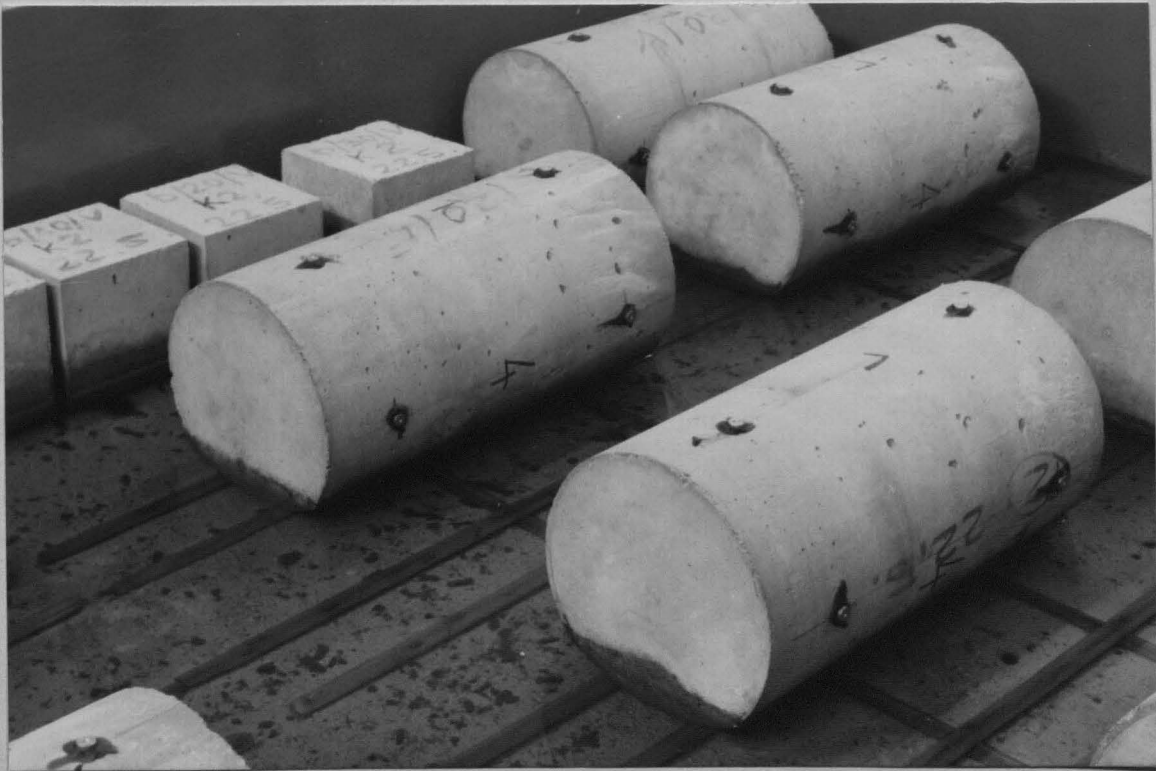
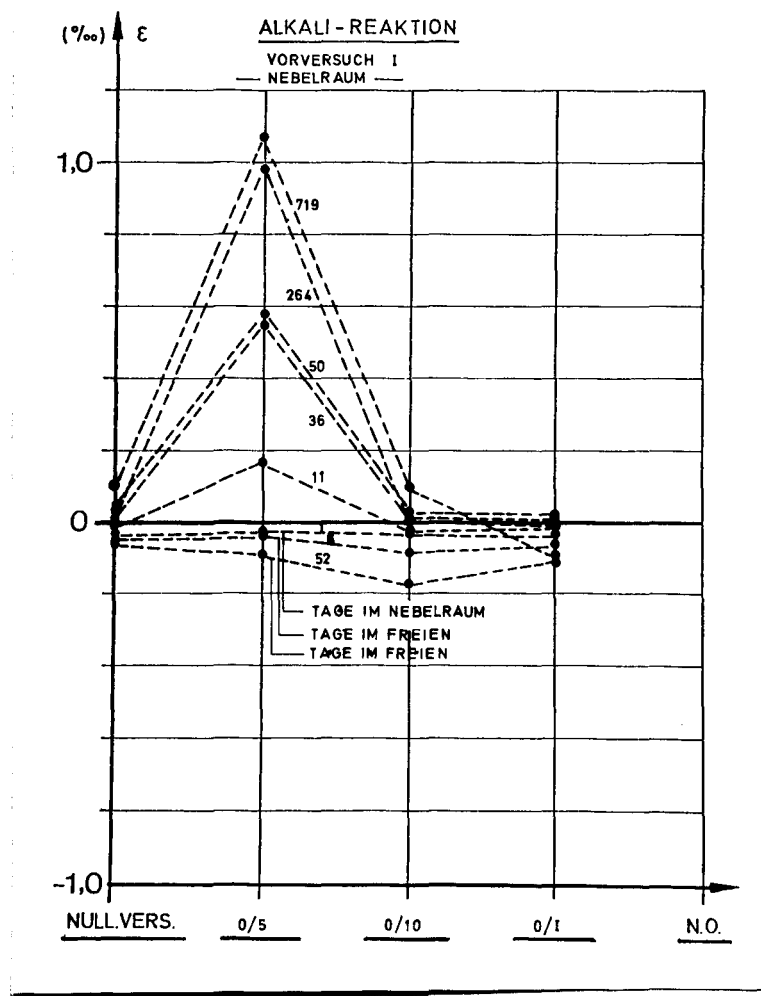


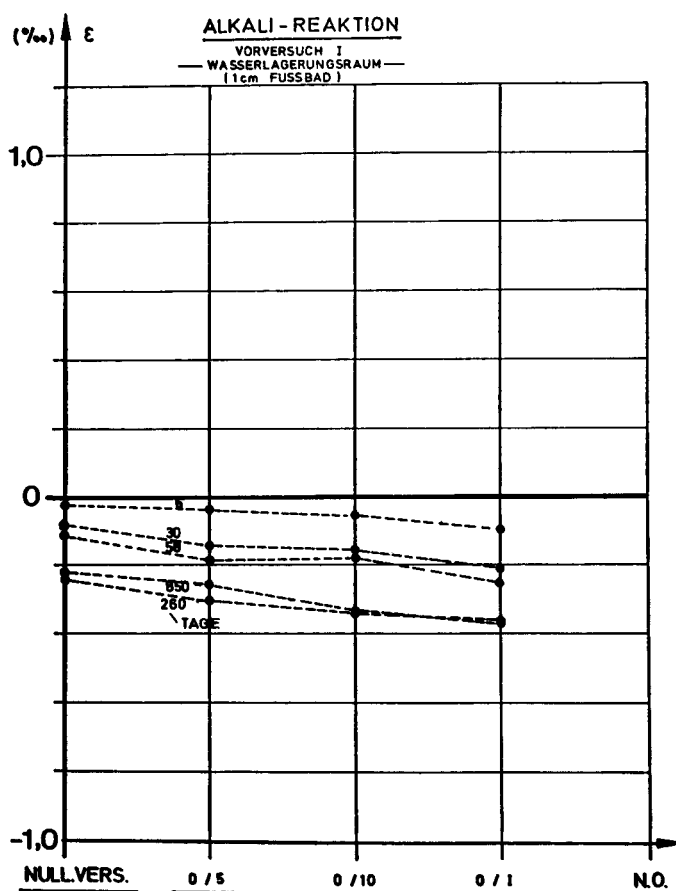
Bild 1: Wasserlagern der Probekörper

Bei den Dehnungsmessungen zeigte die Mischung 0/5 mit 5 % Opalsandstein in allen Zuschlagfraktionen die größten Dehnungen. Nach 50 Tagen war eine Dehnung von 0,6 ‰ und nach 264 Tagen von 1 ‰ bei einer Lagerung im Nebelraum erreicht. Die Mischungen mit 10 % Opalsandstein und reinem Bültwiesch-Kies zeigten keine Reaktion, offensichtlich waren hier die pessimalen Bedingungen schon überschritten. Bild 2 zeigt die Dehnungen der Probekörper im Nebelraum zu den nach Tagen angegebenen Lagerungsdauern.



**Bild 2:** Längenänderung von Betonzylindern mit Opalsandstein.  
0/5 = 5 % Opalsandstein, 0/10 = 10 % Opalsandstein  
0/I = Ivendorf-Zuschlag

An den Probekörpern der Fußbadlagerung konnten keine Dehnungen, sondern nur Schwinden festgestellt werden. Dieses Ergebnis war zunächst äußerst überraschend, da sich bei vorangegangenen Untersuchungen Bohrkerne in Wasser stehend als sehr schnell reagierend erwiesen. Eine Erklärung für dieses unterschiedliche Verhalten muß darin gesehen werden, daß die kapillare Wasseraufnahme von Bohrkerne eines bereits geschädigten, also gerissenen Betons, um ein Vielfaches höher ist als bei einem zum Zeitpunkt des Beginns der Wasserlagerung noch ungestörten Betons, dessen Oberfläche zudem noch durch eine intakte Feinmörtel- bzw. fast reine Zementschicht umhüllt ist. Im letzteren Fall ist die Wasseraufnahme nicht ausreichend, um eine Alkalireaktion innerhalb relativ kurzer Zeit in Gang zu bringen. Bild 3 zeigt das Schwindverhalten der im Wasser stehenden Probekörper.



**Bild 3:** Längenänderung von Betonzylindern mit Opalsandstein  
0/5 = 5 % Opalsandstein, 0/10 = 10 % Opalsandstein  
0/I = Ivendorf-Zuschlag

Bild 4 zeigt das Schwind-Dehnungsverhalten der horizontal gelagerten Probekörper. Während an den Meßstrecken 1, 2 und 4 nur Schwinden festzustellen ist, zeigt die Meßstrecke 3 unter Wasser eine geringe Dehnung, die Körper krümmten sich also, ein ausgeprägtes Alkalitreiben konnte nicht festgestellt werden.

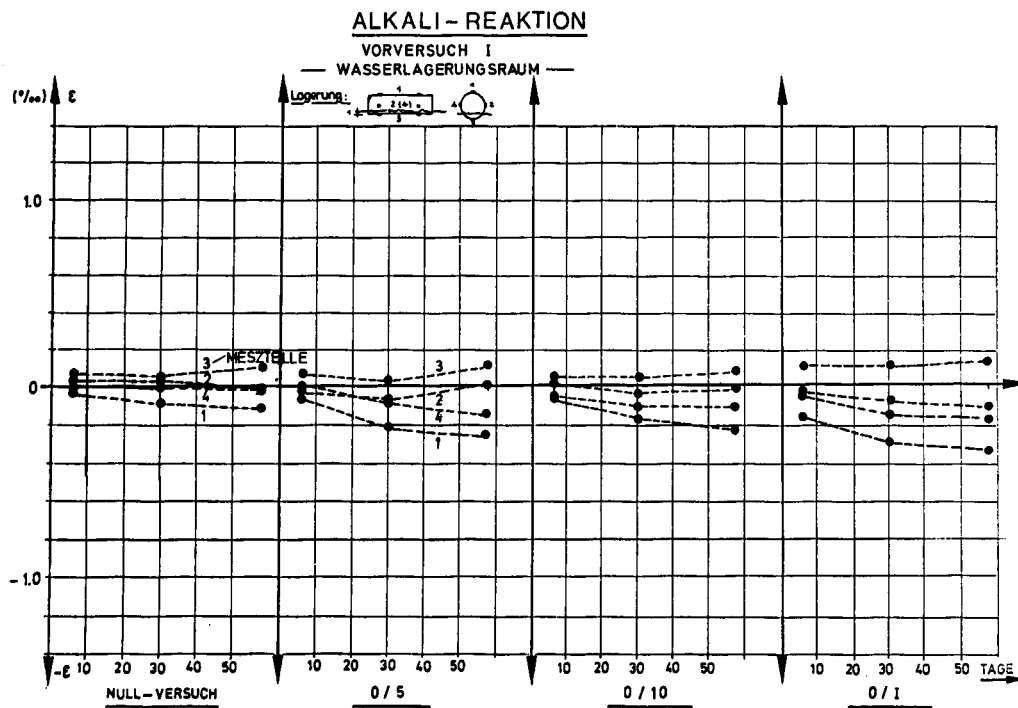


Bild 4: Längenänderung von Betonzylindern mit Opalsandstein  
O/5 = 5 % Opalsandstein, O/10 = 10 % Opalsandstein  
O/I = Ivendorf-Zuschlag

Bei den Proben, die der normalen Witterung ausgesetzt waren, konnten keinerlei Reaktionen festgestellt werden; diese Lagerungsform wurde bei zukünftigen Versuchen nicht mehr angewendet (s. Bild 2).

Als Ergebnis dieser Vorversuche I konnte eine Betonmischung mit 380 kg Zement pro  $m^3$  und einem Opalsandsteingehalt von 5 M.-% im Zuschlag als deutlich alkalitreibend ermittelt werden. Mit dieser Mischung wurden die folgenden Versuche zur Verwendung von Betonzusatzstoffen durchgeführt.

### 2.2.2 Vorversuche II

Bei der ersten Serie der Betonversuche mit Zusatzstoffen (in den Abbildungen mit "Vorversuche II" bezeichnet) wurde von der Betonmischung mit 5 % Opalsandstein im Zuschlag, im folgenden neu mit Null-Versuch bezeichnet, ausgegangen. In dieser Mischung wurden je 10 %, 20 % und 30 % des Zementes in der Serie a durch die Zusatzstoffe ersetzt. In der Serie b wurde die Hälfte des angegebenen Prozentsatzes vom Zement ersetzt, die andere Hälfte wurde zusätzlich zugegeben, es erfolgten also ein Teilaustausch und eine Teilzugabe. Die Abkürzung V gilt in den folgenden Abbildungen für Veltheim-Füller, E für EFA-Füller. Mit Kieselgur ließen sich keine brauchbaren Betonmischungen herstellen; da mit notwendigen W/Z-Werten von 0,65, 0,83 und schließlich 1,03 zu starke betontechnologische Veränderungen erwartet werden mußten, wurden die Kieselgur-Versuche abgebrochen. Die Würfeldruckfestigkeiten bei Abbruch dieser Versuchsserie nach 130 Tagen lagen bei den Kieselgurbetonen um  $30 \text{ N/mm}^2$ , während die Druckfestigkeiten der übrigen Versuchsbetone mehr als doppelt so hohe Werte erreichten. Über die Entwicklung der Druckfestigkeiten wird noch in einem gesonderten Kapitel berichtet.

Die Dehnungsmessungen der horizontal gelagerten Proben sind in Bild 5 bis Bild 8 wiedergegeben. Die Probekörper mit der "Fußbad"-Lagerung (Bild 9 bis Bild 12) zeigten ausschließlich ein Schwinden, ein Einfluß der Flugaschen war nicht erkennbar. Die Probekörper in der Nebel-

---

Anmerkung: Die grafischen Darstellungen der Längenänderungen der Betonzylinder dieser Versuchsreihen (Bild 5 bis 16 und Bild 18 bis 25) befinden sich im Anhang.



raum-Lagerung (Bild 13 bis Bild 16) zeigten auch nach langfristiger Lagerungsdauer nur mäßige Treiberscheinungen. Die Nullprobe erreichte nach 271 Tagen schließlich einen Ausdehnungswert von 0,4 ‰, ein Einfluß der Flugaschen war kaum erkennbar, indem bei 20 % bis 30 % Zementersatz durch Flugaschen die Dehnungen noch 0,2 ‰ betrugen. Obwohl im besten Falle die Dehnung um ca. 50 % mit der Mischung a/20/E, also 20 % Zement durch EFA-Füller ersetzt, reduziert werden konnte, blieben die Gesamtergebnisse unbefriedigend.

### 2.2.3 "Versuch I" mit erhöhtem Zementgehalt

Da in den vorangegangenen Versuchen Treiberscheinungen und ihre anschließende Reduzierung nicht mit ausreichender Deutlichkeit experimentell erreicht werden konnte, wurde eine neue Versuchsserie mit einem erhöhten Zementgehalt aufgestellt. Da im Vorversuch I offensichtlich mit 5 % Opalsandstein und 380 kg Zement pro Kubikmeter ein sogenanntes Pessimum nahezu erreicht war, sollte dieses Verhältnis von Zement zu Opalsandstein auch in den folgenden Versuchen beibehalten werden. Mit einer Erhöhung des Zementgehaltes auf 420 kg/m<sup>3</sup> mußte demnach auch der Gehalt des Opalsandsteines im Zuschlag von 5 % auf 5,5 % erhöht werden. Die anderen Parameter blieben konstant. Auf die "Fußbad"-Wasserlagerung wurde diesmal verzichtet, während die horizontale Wasserlagerung und die Nebelkammerlagerung aus den Vorversuchen beibehalten wurden.

Insgesamt ergab sich für die Grundmischung dieser Versuchsreihe für 1 m<sup>3</sup> Beton folgende Zusammensetzung:

420	kg	PZ	350
189	kg	Wasser	(W/Z-Wert = 0,45)
699,3	kg	0/2	Okerkies
40,7	kg	0/2	Opalsandstein
174,8	kg	2/4	Okerkies
10,2	kg	2/4	Opalsandstein
440,4	kg	4/8	Okerkies
25,6	kg	4/8	Opalsandstein
440,4	kg	8/16	Okerkies
25,6	kg	8/16	Opalsandstein

Der Zement wurde wiederum zu je 10 %, 20 % und 30 % durch die Flugaschen "EFA-Füller" und "Veltheimfüller" in den a-Serien ersetzt, es ergaben sich also Bindemittelgehalte von

420 kg/m<sup>3</sup> Zement ohne Flugasche (Nullversuch)  
378 kg/m<sup>3</sup> Zement mit 42 kg/m<sup>3</sup> Flugasche (a/10...)  
336 kg/m<sup>3</sup> Zement mit 84 kg/m<sup>3</sup> Flugasche (a/20...)  
294 kg/m<sup>3</sup> Zement mit 126 kg/m<sup>3</sup> Flugasche (a/30...)

Für die b-Serie (Teilaustausch und Teilzugabe) ergaben sich folgende Bindemittelgehalte:

420 kg/m<sup>3</sup> Zement ohne Flugasche (Nullversuch)  
399 kg/m<sup>3</sup> Zement mit 42 kg/m<sup>3</sup> Flugasche (b/10...)  
378 kg/m<sup>3</sup> Zement mit 84 kg/m<sup>3</sup> Flugasche (b/20...)  
357 kg/m<sup>3</sup> Zement mit 126 kg/m<sup>3</sup> Flugasche (b/30...)

Bei der horizontalen Wasserlagerung zeigten sich gegenüber den Ergebnissen des "Vorversuchs II" kaum Unterschiede: An der Meßstrecke 1 war ein deutliches Schwinden mit 0,5 % festzustellen, die Meßstrecken 2 und 4 lagen in einer neutralen Zone mit einem Schwind-Dehnmaß von 0 %, während an der im Wasser liegenden Meßstrecke 3 eine Ausdehnung von bis zu 0,8 % zu erkennen war. Lediglich die Mischung b/10/V (also 5 % Austausch und 5 % Zugabe von Veltheimfüller) zeigte eine deutliche Ausnahme. Bis zum Versuchsalter von 52 Tagen verhielt sich diese Betonmischung wie die anderen, dann jedoch öffneten sich einige Risse, und geradezu schlagartig platzte der Probekörper bis zu einem Dehnmaß von 2,5 % auseinander. Diese Beobachtung belegt deutlich die schon in vorangegangenen Kapiteln gemachte Feststellung, daß eine intakte, zementreiche Feinmörtelschicht als normale Außenhaut eines Betons eine für die Alkalireaktion notwendige Wasserzufuhr außerordentlich stark behindern kann.

Da die meisten in Norddeutschland vorkommenden alkalireaktiven Gesteinsarten in der Regel frostunbeständig sind, bestätigten sich so die an Bauwerksschäden gemachten Beobachtungen, daß sich Frostschäden und Alkalitreiben ganz offensichtlich gegenseitig den Weg bereiten und den Schadensablauf wesentlich beschleunigen. Bild 17 zeigt die Probekörper der Mischung b/10/V aus der Nebelraum- und Wasserlagerung. Die Dehnungsmessungen der Horizontallagerung wurden in Bild 18 bis Bild 21 grafisch dargestellt.

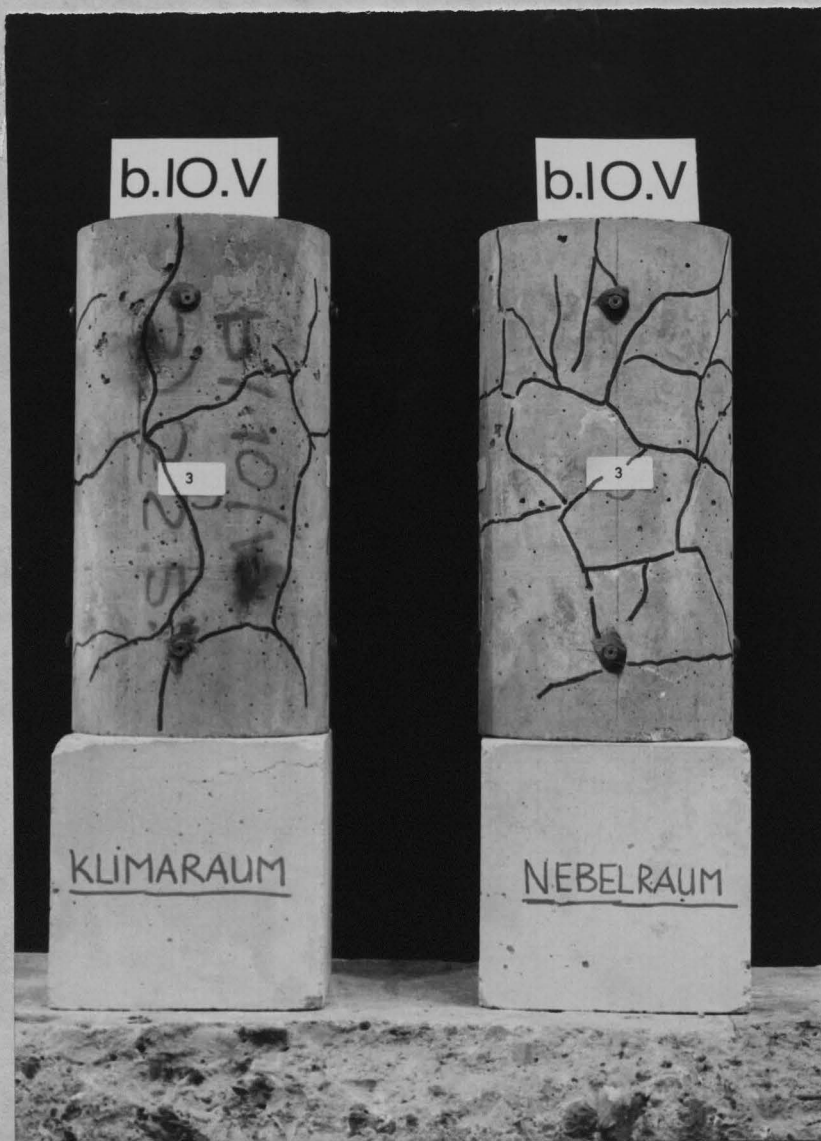


Bild 17: Rißbild von Betonzylindern mit Opalsandstein, alkalireichem Zement und Zugabe "Veltheim-Füller"

Bei der Nebelraumlagerung zeigte sich jetzt an allen Probekörpern die durch die erhöhte Zementzugabe erwarteten stärkeren Treiberscheinungen. In Bild 22 bis Bild 25 ist das Dehnverhalten der zementreicheren Mischungen in der Nebelkammer dargestellt. Während bei der "Nullmischung" mit 5,5 % Opalsandstein ein gegenüber dem Vorversuch I verstärktes Treiben durchaus normal erschien, so überraschte doch das Verhalten der Mischungen mit 10 % Austausch oder Teilaustausch mit Teilzugabe von Zement. Bis zum Versuchsalter von 15 Tagen war eine Verringerung oder ein Gleichbleiben der Treiberscheinungen im Vergleich zur Nullmischung zu registrieren. Mit zunehmendem Versuchsalter setzte jedoch bei den 10 %-Mischungen ein verstärktes Treiben ein, was mit über 3,2 %o nach 255 Versuchstagen bei der b/10/V-Mischung ein absolutes Maximum hatte.

Dieses unerwartete Verhalten läßt sich durch einen relativ engen Bereich des Pessimums für das Verhältnis von Alkaliangebot zu reaktiver Kieselsäure erklären. Das Raster von 0 %, 5 % und 10 % Opalsandstein in den Vorversuchen war offensichtlich zu grob gewählt worden. Um den Versuchsaufwand in Grenzen zu halten, mußte also eine geringe Abweichung vom Pessimum in Kauf genommen werden. Durch die relativ geringe Zugabe von reaktiver Kieselsäure in Form von Flugasche ließ sich die gesamte Betonmischung offenbar dichter an dieses sog. "Pessimum" heranrücken. Bild 26 zeigt zwei dieser durch Alkalitreiben stark gerissenen Probekörper. Bei weiterer Zugabe von Flugasche erreichten die Dehnungen wieder Werte der reaktiven Nullmischung (wie z.B. bei b/20/V und b/20/E) oder wurden sogar fast auf die Werte eines Normalbetons (N.O.), der als Grundversuch mit Normalzuschlag und Normalzement hergestellt war, reduziert. Bei diesen für das Versuchsziel entscheidenden Betonmischungen waren 20 % und 30 % des Zementes durch Veltheim-Füller ersetzt worden.



Bild 26: Rißstrukturen von Betonzylindern mit Opalsandstein und Austausch von Zement durch Flugasche (a) und Teilaustausch und Teilzugabe (b)

Mit EFA-Füller war eine nicht ganz so starke Reduzierung des Treibens zu erkennen, aber bei Austausch von 30 % des Zementes lag der Dehnungswert mit 0,4 ‰ nur gering über dem Dehnungswert von 0,28 ‰ des Normalbetons. In Tabelle 3 ist die prozentuale Reduzierung des Alkalitreibens durch die Verwendung von Flugasche für die einzelnen Betonmischungen wiedergegeben.

Tabelle 3: Veränderung des Alkalitreibens reaktiver Betonmischungen durch Verwendung von Steinkohlenflugaschen

	max. Dehnung nach 255 Tagen ‰	Rückgang (-) oder Zunahme (+) der Dehnungen gegenüber Nullvers. in %
Normalbeton N.O.	0,28	-
Nullversuch mit 5,5 % Opalsandstein	1,40	
a / 10 / E	1,9	+ 44
a / 20 / E	0,75	- 58
a / 30 / E	0,62	- 70
a / 10 / V	2,70	+ 116
a / 20 / V	0,38	- 91
a / 30 / V	0,35	- 94
b / 10 / E	2,90	+ 133
b / 20 / E	1,25	- 13
b / 30 / E	0,85	- 49
b / 10 / V	3,25	+ 165
b / 20 / V	1,25	- 13
b / 30 / V	0,85	- 49

Zusammensetzung der Betonmischungen siehe Seite 14 und 15

Es bedeutet: E = "EFA-Füller", V = "Veltheim-Füller"

Von verschiedenen Seiten wurde in der Vergangenheit die Vermutung aufgestellt, daß der Einfluß von Betonzusatzstoffen ausschließlich darin bestehe, daß durch Ersatz eines Teiles des Zementes der Anteil des Alkaliangebotes verringert werde. Durch Vergleich einzelner Mischungen aus verschiedenen Serien mit gleichem Zementgehalt läßt sich anschaulich belegen, wie die Flugaschen direkt in den chemischen Reaktionsablauf der Alkalireaktion eingreifen. In Tabelle 4 ist das Dehnungsverhalten einiger solcher Betonmischungen zum Vergleich gegenübergestellt.

Tabelle 4: Gegenüberstellung des Dehnungsverhaltens einiger ausgewählter Betonmischungen

Betonmischung	Zementgehalt kg/m <sup>3</sup>	Flugaschegehalt kg/m <sup>3</sup>	Dehnung nach 250 Tagen ‰
Vorversuch I	380	0	0,6
b/20/V Vers. I	378	84	1,2
a/10/V Vers. I	378	42	2,7
Nullvers. Vers. I	420	0	1,4
a/20/V Vers. I	336	84	0,38

Zum Beispiel haben die b/20-, a/10- und die Vorversuch-Mischungen alle einen gleichen Zementgehalt von ca. 380 kg/m<sup>3</sup>. Das an diesen Betonmischungen festgestellte unterschiedliche Dehnungsverhalten kann also nur dem Einfluß der in unterschiedlicher Menge zugegebenen Steinkohlenflugaschen zugeschrieben werden. Vergleicht man die Nullversuchs-Mischung der Versuchsreihe I mit 420 kg/m<sup>3</sup> Zement mit der a/10/V-Mischung mit 378 kg/m<sup>3</sup>, so entwickelt die Mischung mit dem niedrigeren Zementgehalt die größere Dehnung, der Austausch von Ze-



ment durch Flugasche in geringem Umfang vergrößert in diesem Falle die Treiberscheinungen beträchtlich. Erst ein Austausch von Zement durch Flugasche in größerem Umfang (Mischung a/20/V in Tabelle 4) reduziert die Treiberscheinungen auf ein zu akzeptierendes Endmaß. Hieraus ist ersichtlich, daß durch die Zugabe von Steinkohlenflugaschen zu alkalireaktiven Betonmischungen auf chemischem Wege in den Ablauf der Alkalireaktion eingegriffen wird, indem das pessimale Verhältnis von reaktiver Kieselsäure zu den Alkalien des Zements, sowohl fördernd als auch die Alkalireaktion behindernd nachhaltig verändert werden kann.

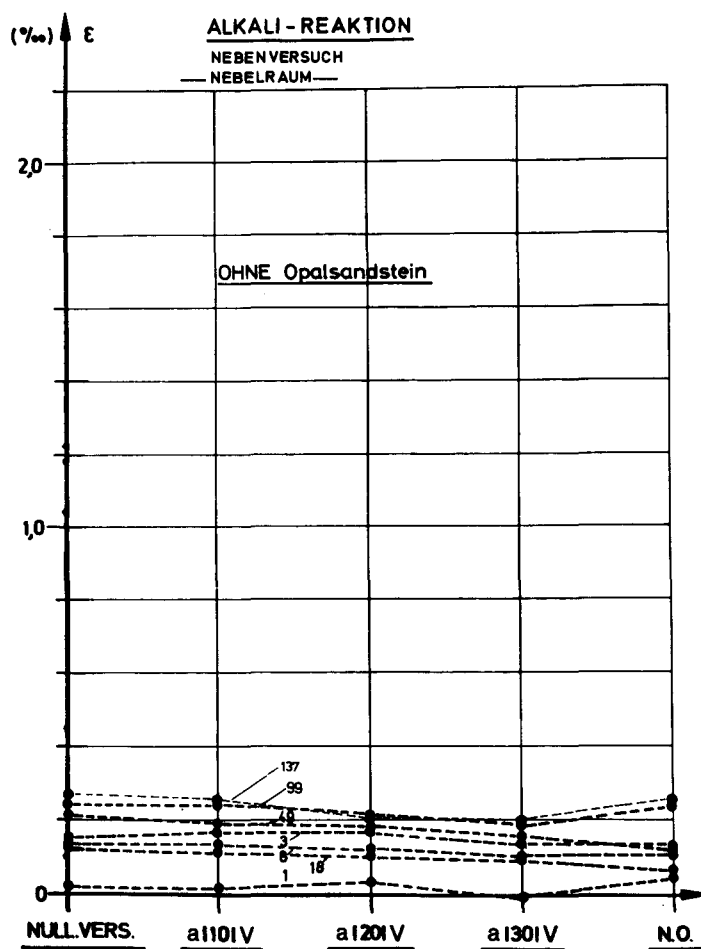
Die einzige bekannte Spezifikation, die Anforderungen an Betonzusatzstoffe definiert, die zur Verhinderung von Alkalitreiben verwendet werden sollen, ist die amerikanische Norm ASTM C 441 [6]. Dieser Test hält eine Reduzierung der Dehnung um mindestens 75 % für ausreichend, um ein Puzzolan als Zusatzstoff zur Verhinderung des Alkalitreibens anzuerkennen. Nach dieser Spezifikation würden sowohl der Veltheim-Füller als auch der EFA-Füller als Inhibitoren für die Alkali-Zuschlag-Reaktion gelten; allerdings muß einschränkend erwähnt werden, daß die ASTM-Dehnungsversuche an speziellen Feinmörtelprismen mit Pyrexglas als Zuschlag durchgeführt werden, so daß ein direkter Vergleich der ASTM-Anforderungen mit den Ergebnissen unserer Betonversuche mit natürlichen Zuschlägen nicht möglich ist. Der ASTM-Test zur Erkennung der Wirksamkeit von Betonzusatzstoffen erscheint aus diesem Grunde problematisch, da er in keiner Weise Rücksicht auf unterschiedliche Gehalte reaktiver Gesteine im Zuschlag und auf unterschiedliche Alkaligehalte der Zemente nimmt.

#### 2.2.4 Nebenversuche

Allgemein technologische Eigenschaften von mit Flugaschen versetzten Betonen zu ermitteln, war nicht Aufgabe des vorliegenden Forschungsvorhabens. Hier sei an die zahlreichen Publikationen in der inter-



nationalen und deutschen Fachpresse verwiesen [7], [8]. Lediglich zur zusätzlichen Kontrolle wurden noch einige Grundversuche mit Betonmischungen durchgeführt, in denen kein Opalsandstein enthalten war, sondern nur ein inerter Zuschlag, und der alkalireiche Zement zu 10, 20 und 30 % durch Flugasche vom Typ "Veltheim-Füller" ersetzt wurde. Diese Versuche erschienen im nachhinein dringend erforderlich, da festgestellt wurde, daß Flugaschen die Treiberscheinungen von alkalireaktiven Betonmischungen wesentlich fördern können, wenn sie in geringen Mengen einem Beton zugegeben wurden. So bestand die Befürchtung, ob Flugaschen auch allein in Verbindung mit alkalireichen Zementen Treiberscheinungen in betonschädigendem Ausmaß verursachen könnten. In der Nebelkammer-Lagerung ergaben sich bis zu einem Versuchsalter von 137 Tagen keine auffallenden Veränderungen im Dehnungsverhalten der flugascheversetzten Betone gegenüber den flugasche-freien Betonen. Bild 27 zeigt die Ergebnisse dieser Versuche.



**Bild 27:** Längenänderung von Betonzylindern aus Betonen mit alkalireichem Zement und Steinkohlenflugasche ("Veltheim-Füller")

Probewürfel der einzelnen Betonmischungen wurden jeweils nach Beendigung des Versuchsprogramms auf ihre Druckfestigkeit überprüft. Hierdurch ergaben sich recht unterschiedliche Betonalter zum Zeitpunkt der Druckfestigkeitsprüfung. Die Ergebnisse sind in Bild 28 wiedergegeben.

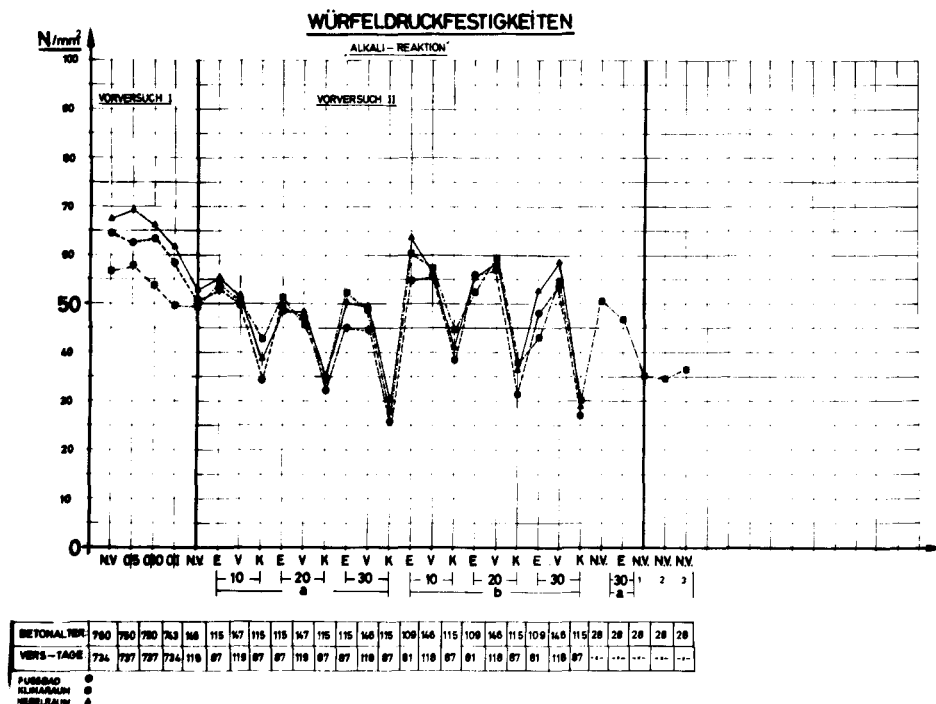


Bild 28: Einfluß von Betonzusatzstoffen auf die Festigkeitsentwicklung der Versuchsbetone

E = "EFA-Füller"

V = "Veltheim-Füller"

K = Kieselgur

Eine Umrechnung der Druckfestigkeiten gemäß der Nacherhärtungskurve nach Hummel [9] ergab für eine 120-Tage-Druckfestigkeit Werte zwischen 50 und 60 N/mm<sup>2</sup>. Eine signifikante Veränderung der Druckfestigkeiten durch Verwendung von Flugasche konnte nicht ermittelt werden,

lediglich die Kieselgur-Betone fielen deutlich ab, weshalb diese Betonmischungen auch aus dem weiteren Versuchsprogramm herausgenommen wurden. Auffallend waren die hohen Festigkeiten reaktiver Betonmischungen der Vorversuche I. Offensichtlich spielten hier die kleinen Versuchskörperabmessungen eine entscheidende Rolle, so daß zerstörende Spannungen vor Eintreten schädigender Rißbildungen durch Kriechvorgänge abgebaut werden konnten; auch eine nachträgliche Ausheilung, wie sie auch von anderen Autoren festgestellt wurde, kann nach 750 Versuchstagen nicht ausgeschlossen werden [10].

Zusammenfassend kann festgestellt werden, daß die betontechnologischen Eigenschaften der Betone durch Verwendung von Flugaschen nicht grundlegend verändert werden, wenn auch sicherlich durch unterschiedlichen Mehlkorngesamt mit graduellen Veränderungen gewisser Eigenschaften gerechnet werden muß [7].

### 3. Zusammenfassung

Die Versuche haben gezeigt, daß es möglich ist, durch die Zugabe von kieselsäurereichen Betonzusatzstoffen die Treiberscheinungen infolge einer Alkali-Zuschlag-Reaktion auf ein zu tolerierendes Minimum zu reduzieren. Insbesondere eignen sich hierzu Steinkohlenflugaschen mit einem hohen Glasanteil. Nach den bisher vorliegenden Ergebnissen kann zur Zeit noch keine berechenbare Mischungsrezeptur angegeben werden, sondern es müssen je nach Alkaligehalt und Menge des zu verwendenden Zementes und des Anteils der reaktiven Komponenten im Zuschlag gezielte Eignungsprüfungen durchgeführt werden.

Unterschiede im Verhalten der beiden Flugaschen Veltheim-Füller und EFA-Füller konnten nur in geringem Umfang graduell festgestellt werden.

Bei einer unkontrollierten Zugabe von Betonzusatzstoffen z.B. zur Verbesserung der Verarbeitbarkeit von Transportbeton besteht die Gefahr, daß bei potentiell reaktiven Zuschlägen eine Alkalireaktion deutlich gefördert wird, nämlich dann, wenn die pessimalen Bedingungen im  $\text{SiO}_2$  : Alkali-Verhältnis in der normalen Betonmischung noch nicht erreicht sind, sondern erst durch die weitere Zugabe eines reaktiven Zusatzstoffes eintreten.

#### 4. Literaturverzeichnis

- [4] Andreassen, A.H.M., und Christensen, K.E.H.:  
Investigation of the effect of some pozzolans on alkali-aggregate-reactions in concrete. The Danish National Institute of Building Research, Copenhagen 1957, Progress Report L 1.
  
- [6] ASTM-Test C 441: Effectiveness of mineral admixtures in preventing excessive expansion of concrete due to the alkali-aggregate-reaction.  
1967 Book of ASTM Standards, Philadelphia 1967
  
- [9] Hummel, A.: Das Beton-ABC, Berlin 1959
  
- [7] Kokubu, M.: Fly Ash and Fly Ash Cement. Proceedings of the Fifth International Symposium on the Chemistry of Cement, Vol. IV, 75 - 113, Tokio 1968.
  
- [5] Ludwig, U.: Einflüsse auf die Alkali-Zuschlag-Reaktion  
Cement and concrete Reserch 6, (1976), 765 - 772.

- [10] Ludwig, U.: Untersuchungen zur Sanierung von Bauwerken mit Schäden infolge Alkalireaktion.  
Abschlußbericht zum Forschungsvorhaben des BMV an der Brücke BW 211, Aachen 1977
- [8] Lühr, H.P.: "Derzeitiger Stand des Zulassungsverfahrens für Steinkohlenflugasche als Bindemittelkomponente im Beton und Stahlbeton in der BRD"  
Betonstein-Zeitung 37 (1971), S. 16 - 21
- [1] Niemeyer, E.A.: Betonzuschlag in Schleswig-Holstein  
Schriftenreihe der Zementindustrie 40, (1973), 37 - 55.
- [2] Schwick, W.: Das Auftreten alkalireaktionsfähiger Betonzuschläge in Niedersachsen. Forschungsbericht des Nieders. Min. d. Finanzen Nr. 40 40 30, Braunschweig 1975.
- [3] Sprung, S.: Einfluß von Zement und Zusätzen auf die Alkalireaktion  
Schriftenreihe der Zementindustrie H. 40, (1973), 69 - 78.

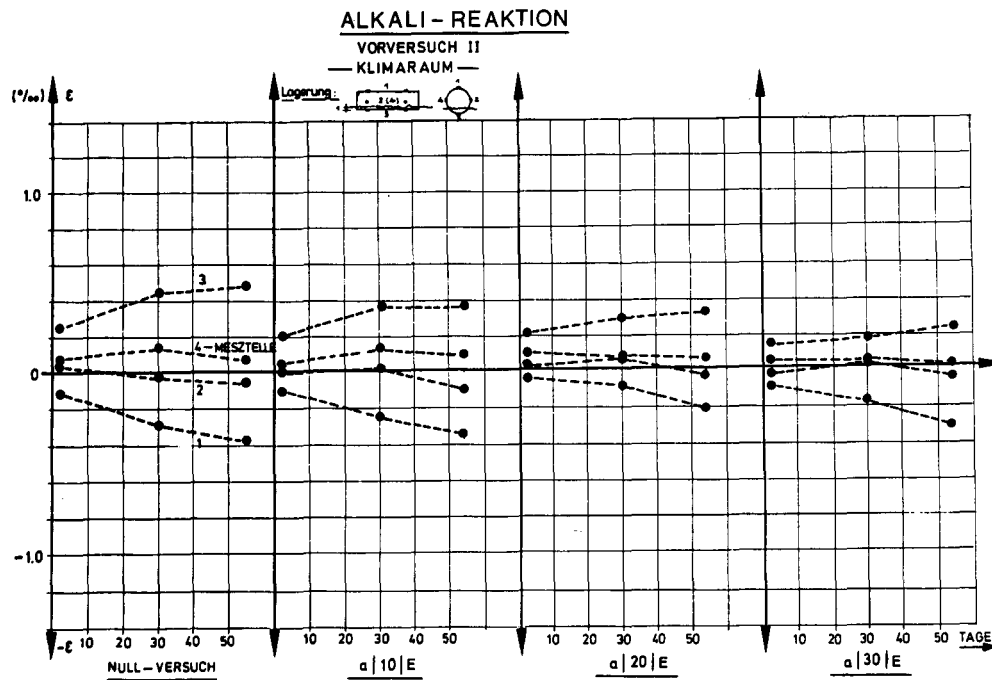


Bild 5: Längenänderung von Betonzylindern; horizontale Wasserlagerung  
Nullversuch mit  $380 \text{ kg/m}^3$  Zement; Betonzusatzstoff: "EFA-Füller"

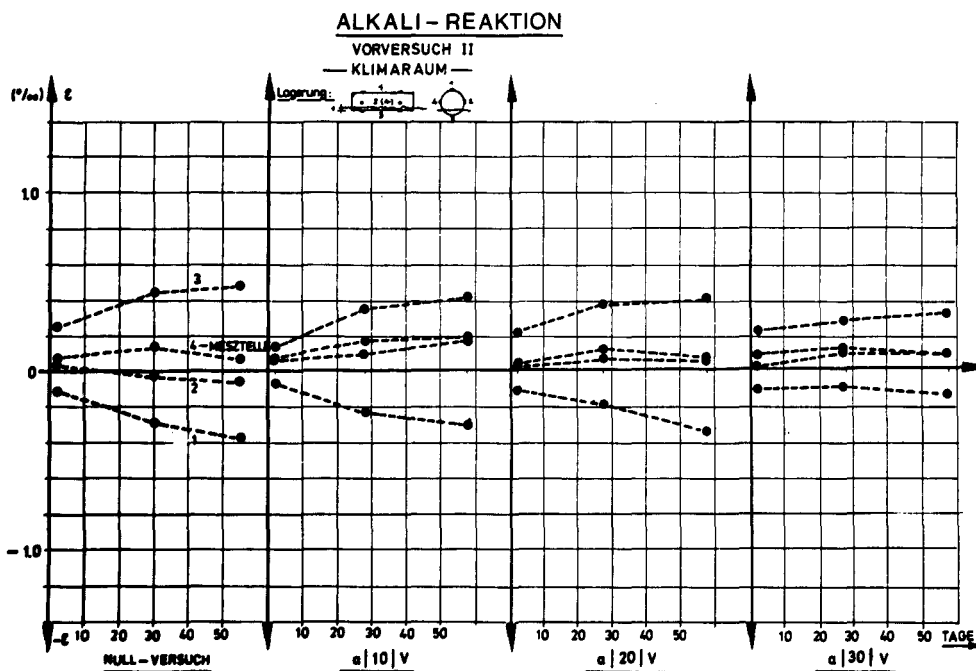
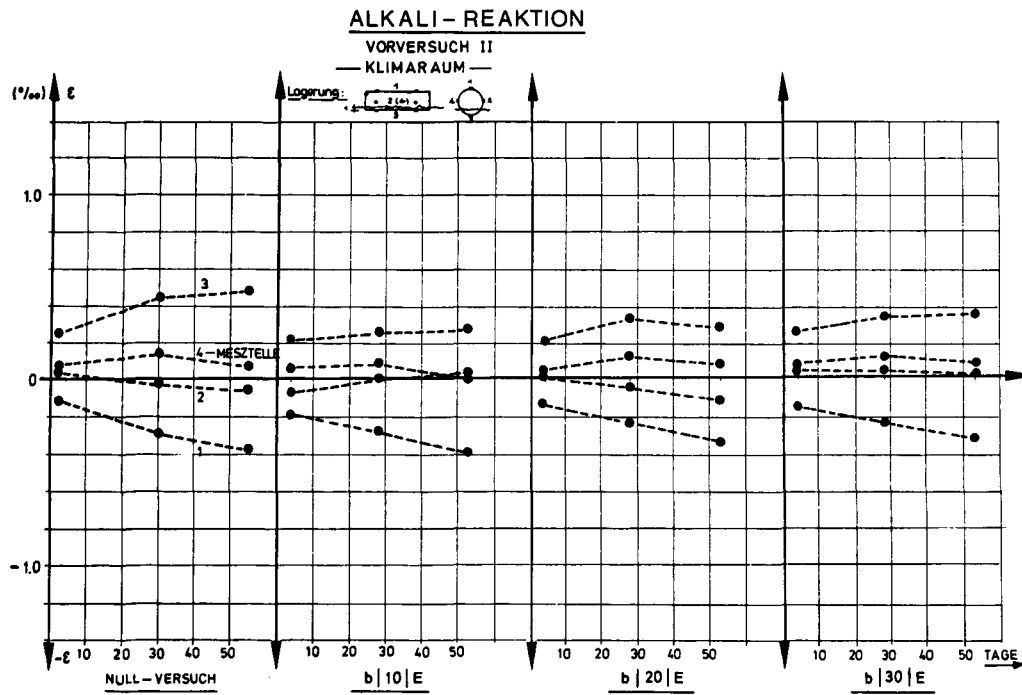
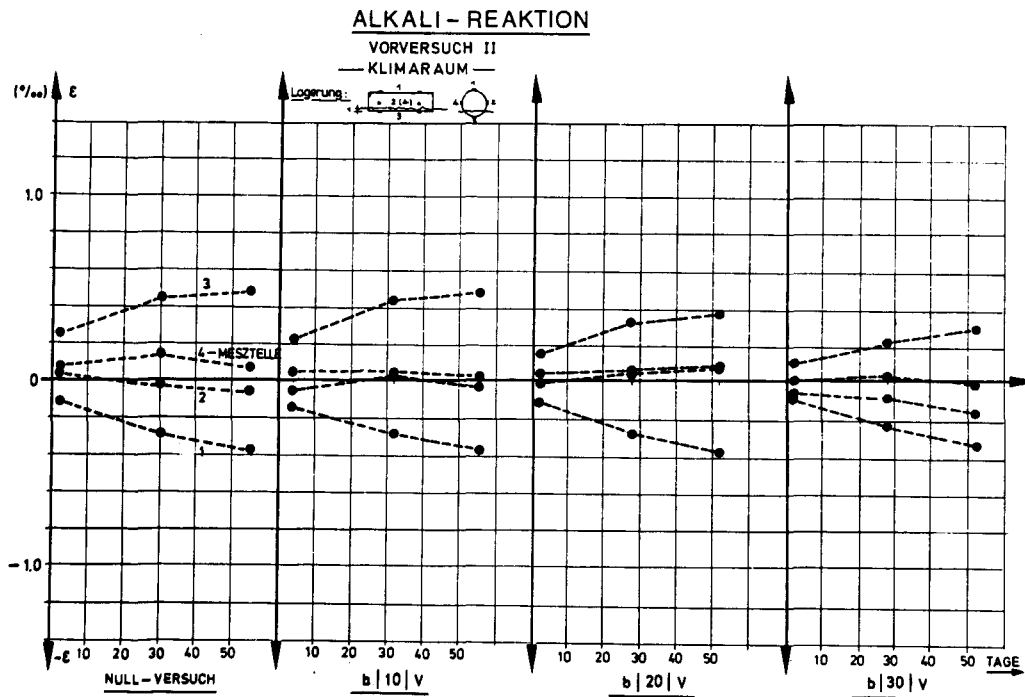


Bild 6: Längenänderung von Betonzylindern; horizontale Wasserlagerung  
Nullversuch mit  $380 \text{ kg/m}^3$  Zement; Betonzusatzstoff: "Veltheim-Füller"



**Bild 7:** Längenänderung von Betonzylindern; horizontale Wasserlagerung  
Nullversuch mit  $380 \text{ kg/m}^3$  Zement; Betonzusatzstoff: "EFA-Füller"



**Bild 8:** Längenänderung von Betonzylindern; horizontale Wasserlagerung  
Nullversuch mit  $380 \text{ kg/m}^3$  Zement; Betonzusatzstoff: "Veltheim-Füller"

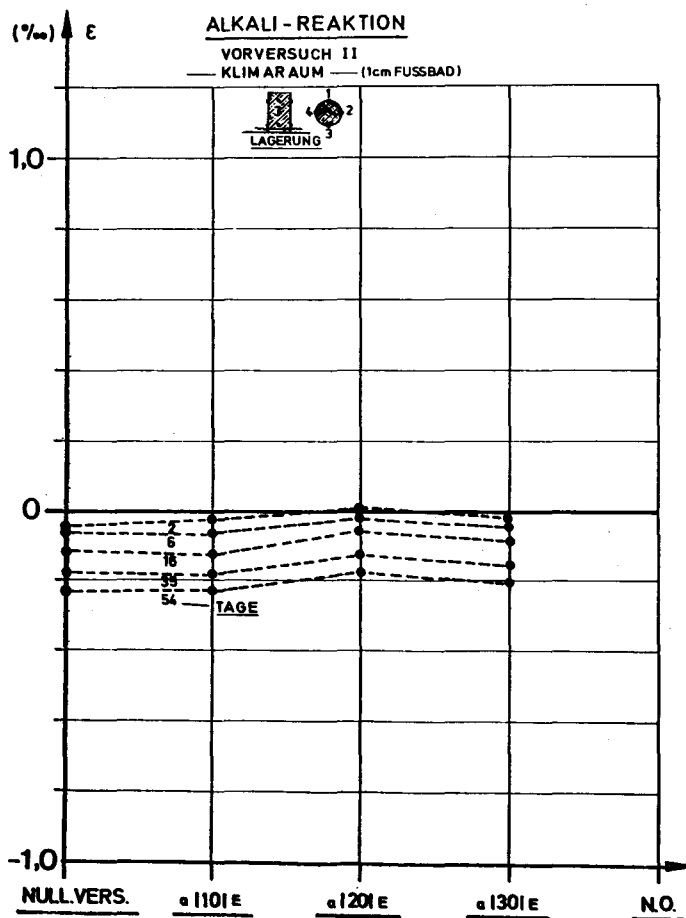


Bild 9: Längenänderung von Betonzylindern; Fußbadlagerung  
 Nullversuch mit  $380 \text{ kg/m}^3$  Zement  
 Betonzusatzstoff: "EFA"-Füller

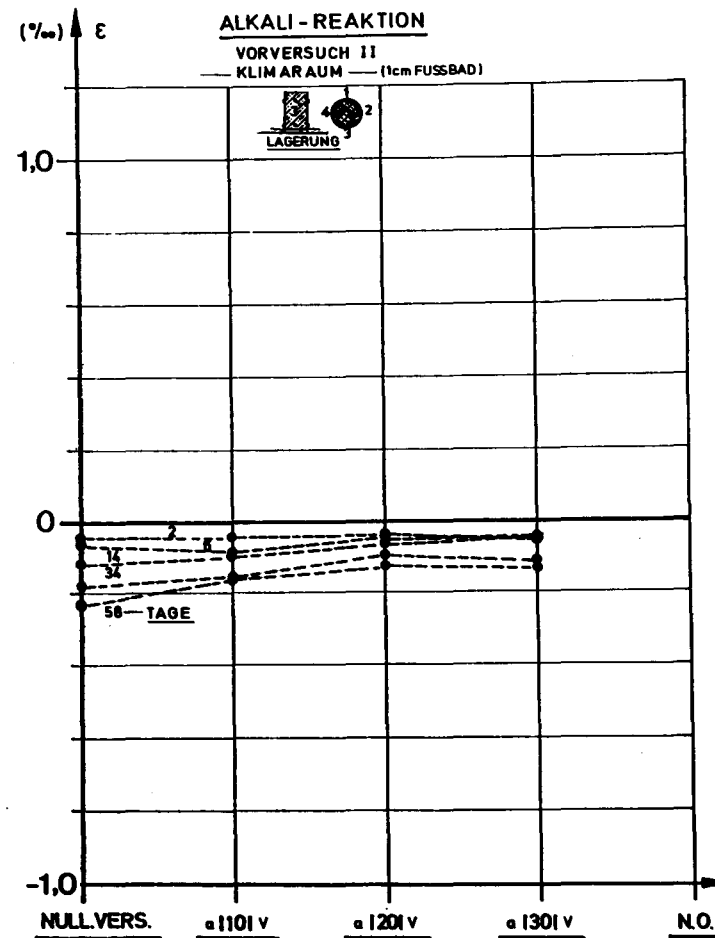
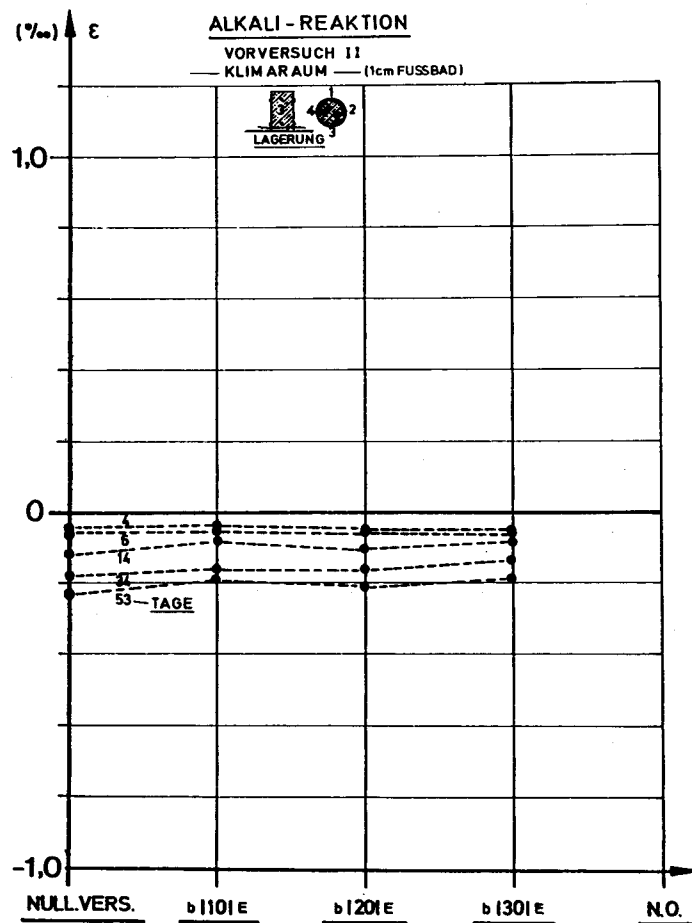
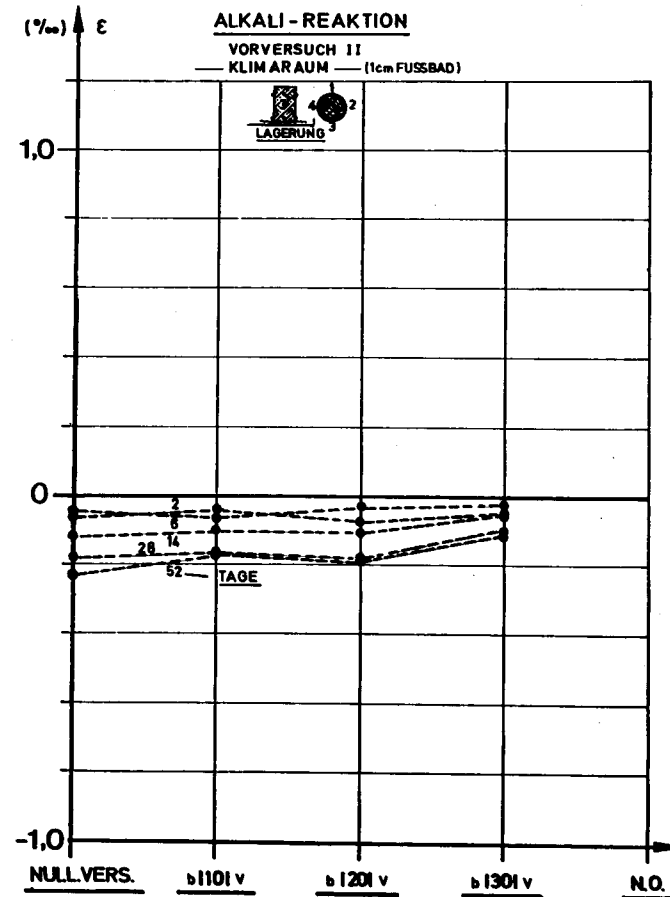


Bild 10: Längenänderung von Betonzylindern; Fußbadlagerung  
 Nullversuch mit  $380 \text{ kg/m}^3$  Zement  
 Betonzusatzstoff: "Veltheim"-Füller





**Bild 11:** Längenänderung von Betonzylindern; Fußbadlagerung  
Nullversuch mit  $380 \text{ kg/m}^3$  Zement  
Betonzusatzstoff: "EFA"-Füller"



**Bild 12:** Längenänderung von Betonzylindern; Fußbadlagerung  
Nullversuch mit  $380 \text{ kg/m}^3$  Zement  
Betonzusatzstoff: "Veltheim-Füller"

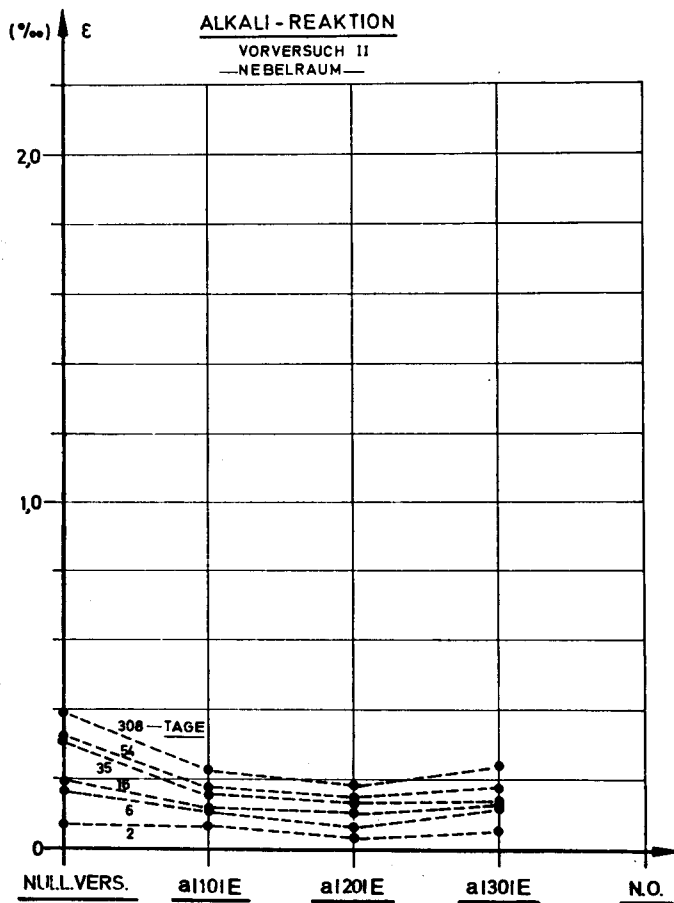


Bild 13: Längenänderung von Betonzylindern; Nebelkammer-lagerung; Nullversuch mit  $380 \text{ kg/m}^3$  Zement  
Betonzusatzstoff: "EFA-Füller"

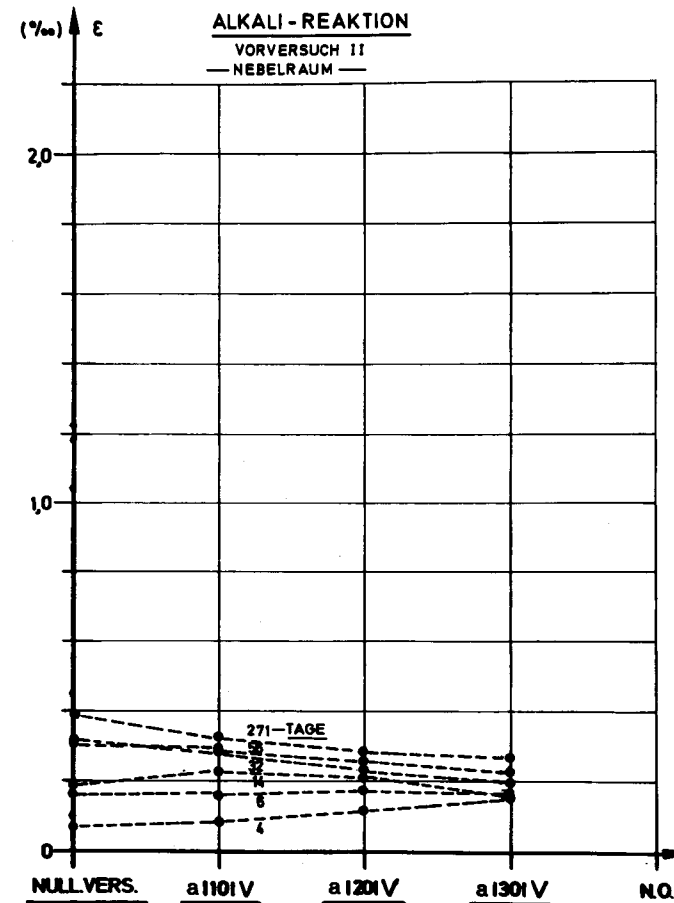


Bild 14: Längenänderung von Betonzylindern; Nebelkammer-lagerung; Nullversuch mit  $380 \text{ kg/m}^3$  Zement  
Betonzusatzstoff: "Veltheim-Füller"

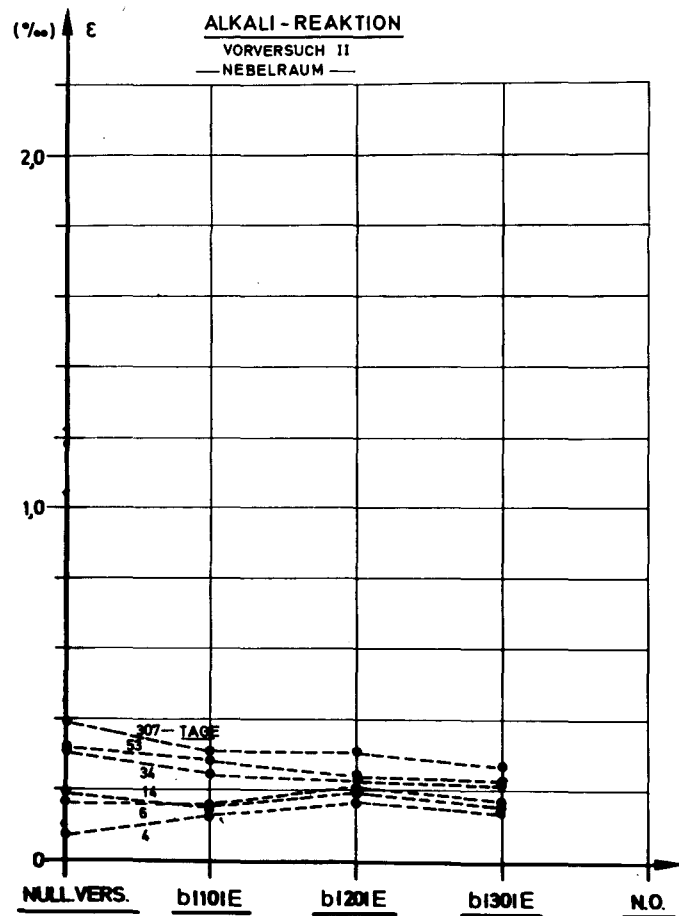


Bild 15: Längenänderung von Betonzylindern; Nebelkammerlagerung; Nullversuch mit 380 kg/m<sup>3</sup> Zement  
Betonzusatzstoff: "EFA-Füller"

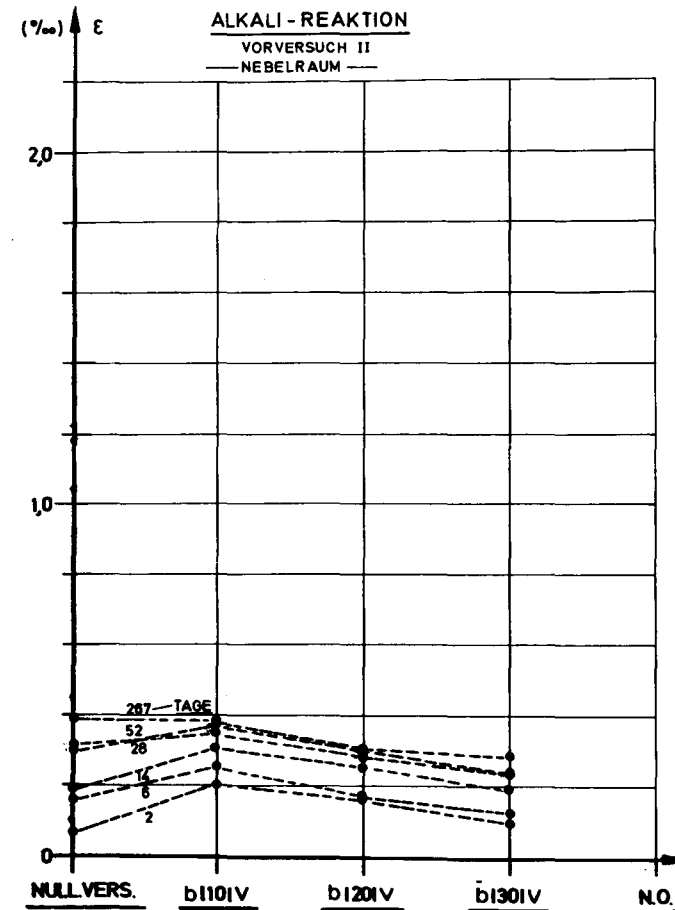


Bild 16: Längenänderung von Betonzylindern; Nebelkammerlagerung; Nullversuch mit 380 kg/m<sup>3</sup> Zement  
Betonzusatzstoff: "Veltheim-Füller"

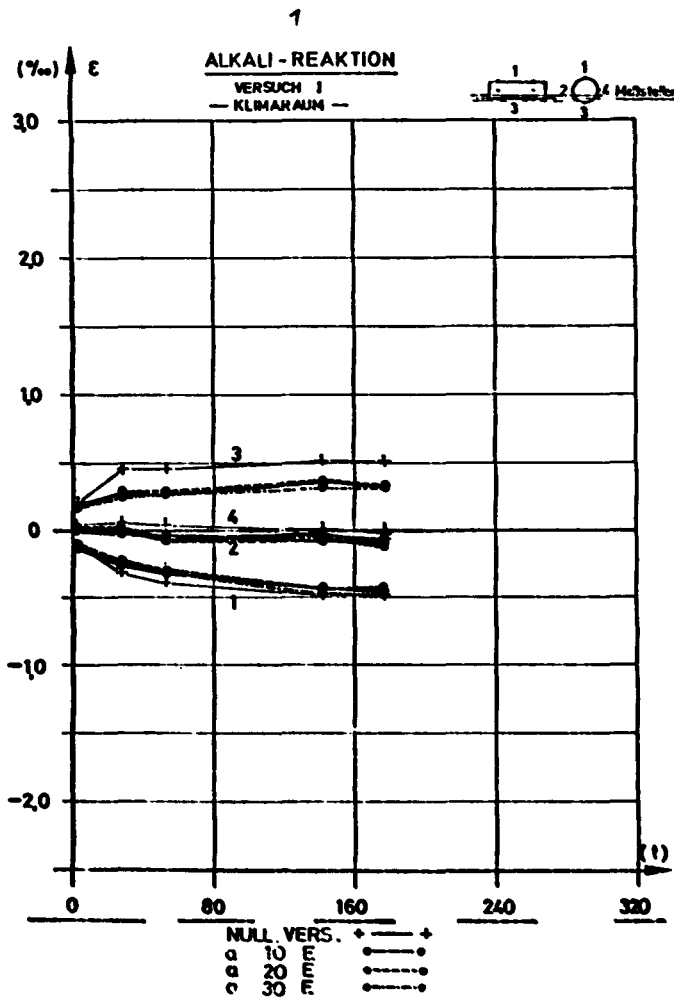


Bild 18: Längenänderung von Betonzylindern; horizontale Wasserlagerung; Nullversuch mit  $420 \text{ kg/m}^3$  Zement Betonzusatzstoff: "EFA-Füller"

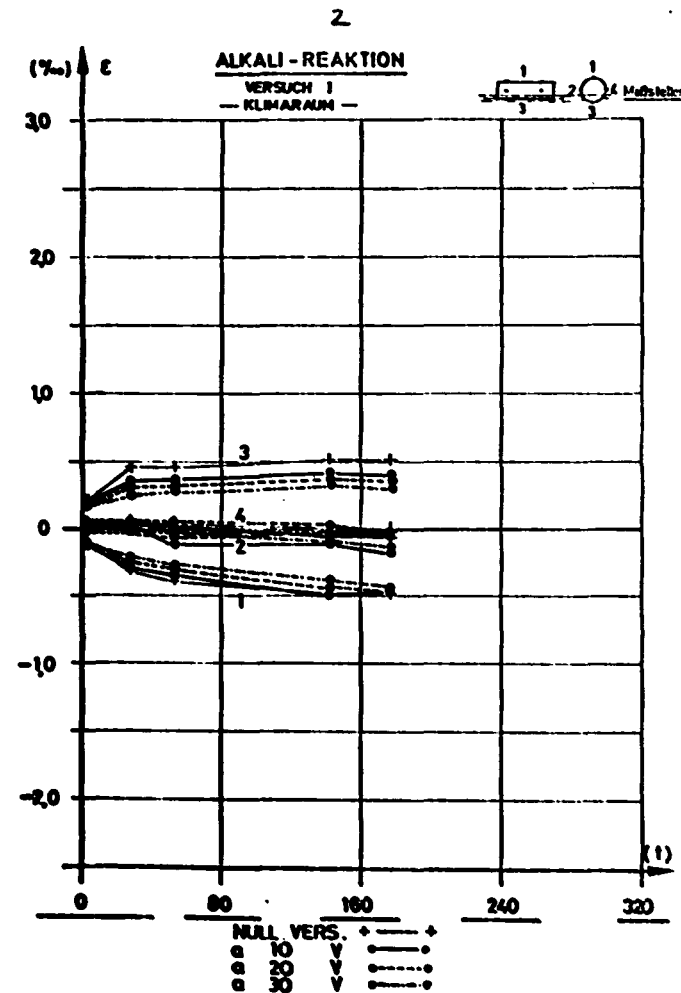


Bild 19: Längenänderung von Betonzylindern; horizontale Wasserlagerung; Nullversuch mit  $420 \text{ kg/m}^3$  Zement Betonzusatzstoff: "Veltheim-Füller"

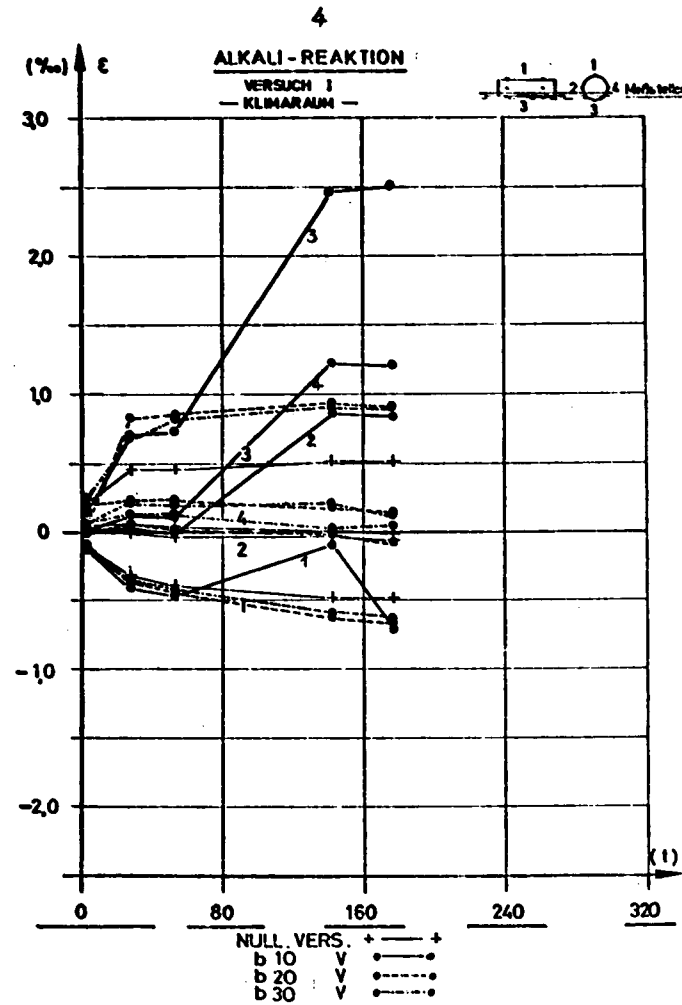
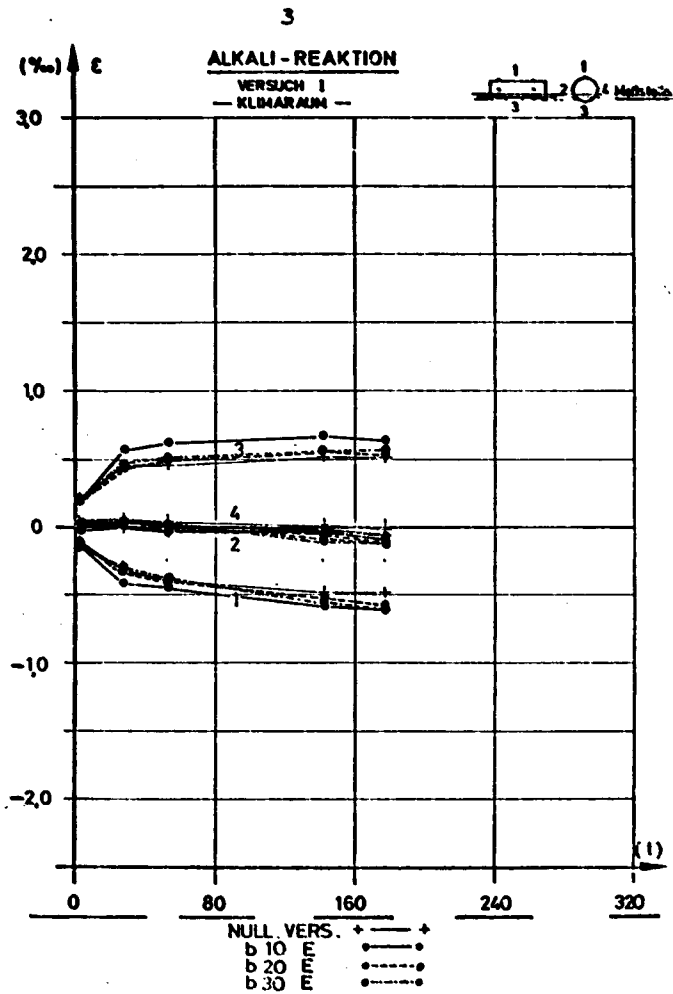


Bild 20: Längenänderung von Betonzyindern; horizontale Wasserlagerung; Nullversuch mit  $420 \text{ kg/m}^3$  Zement  
Betonzusatzstoff: "EFA-Füller"

Bild 21: Längenänderung von Betonzyindern; horizontale Wasserlagerung; Nullversuch mit  $420 \text{ kg/m}^3$  Zement  
Betonzusatzstoff: "Veltheim-Füller"

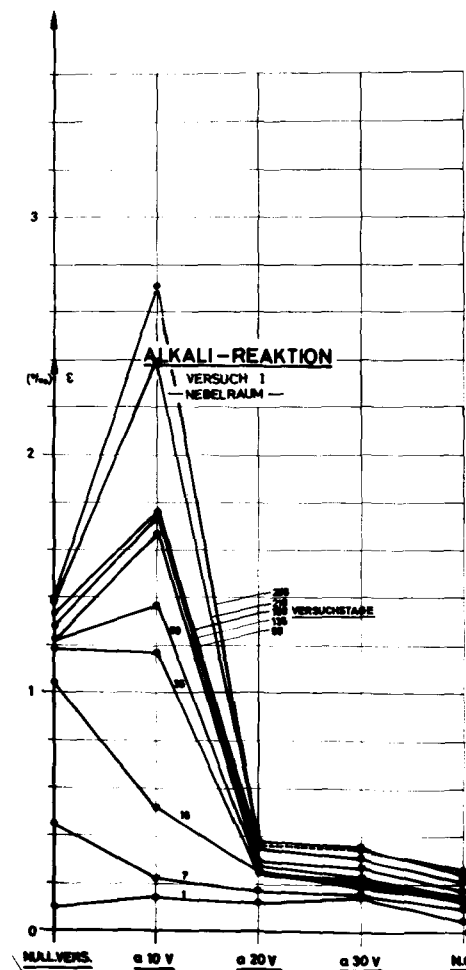
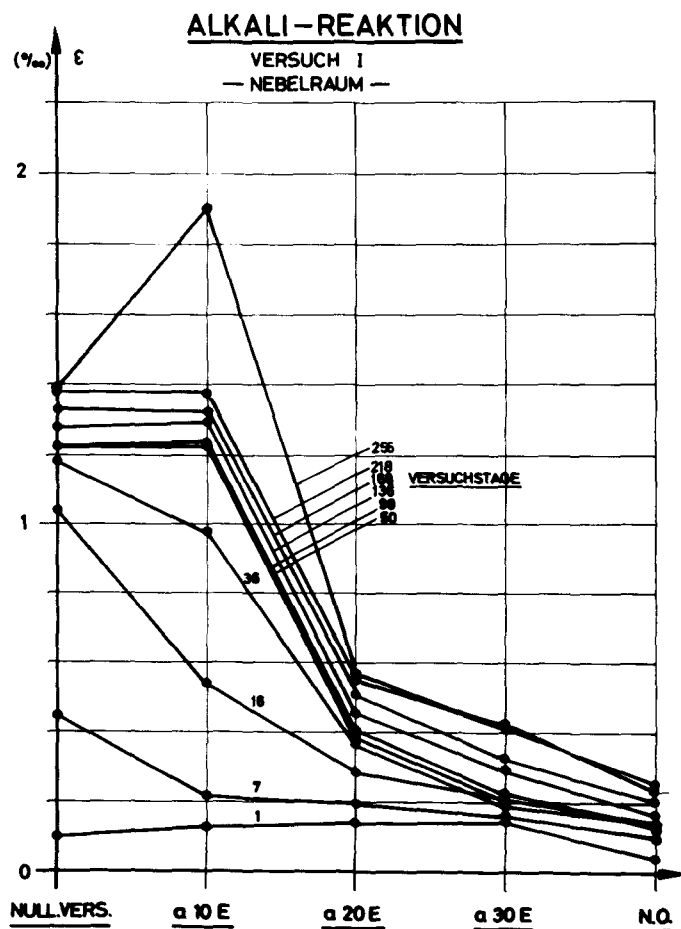


Bild 22: Längenänderung von Betonzylindern; Nebelkammer-lagerung; Nullversuch mit  $420 \text{ kg/m}^3$  Zement  
Betonzusatzstoff: "EFA-Füller"

Bild 23: Längenänderung von Betonzylindern; Nebelkammer-lagerung; Nullversuch mit  $420 \text{ kg/m}^3$  Zement  
Betonzusatzstoff: "Veltheim-Füller"

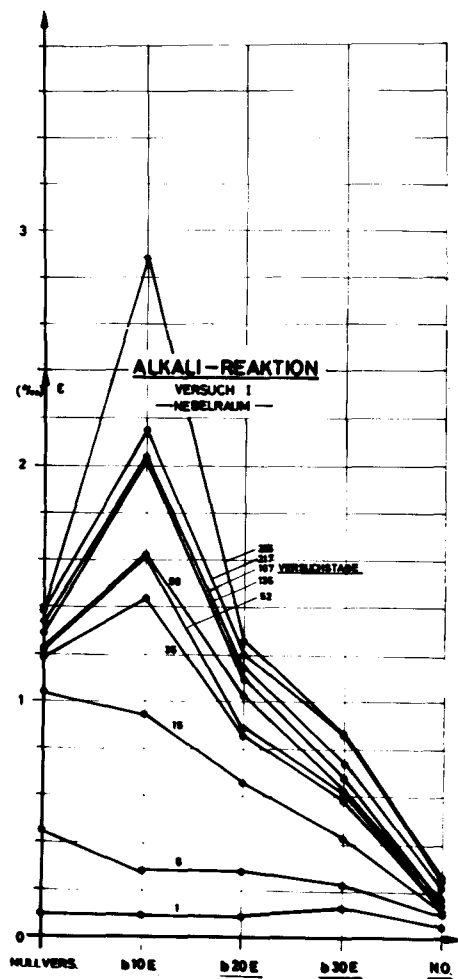


Bild 24: Längenänderung von Betonzylindern; Nebelkammer-lagerung; Nullversuch mit  $420 \text{ kg/m}^3$  Zement  
Betonzusatzstoff: "EFA-Füller"

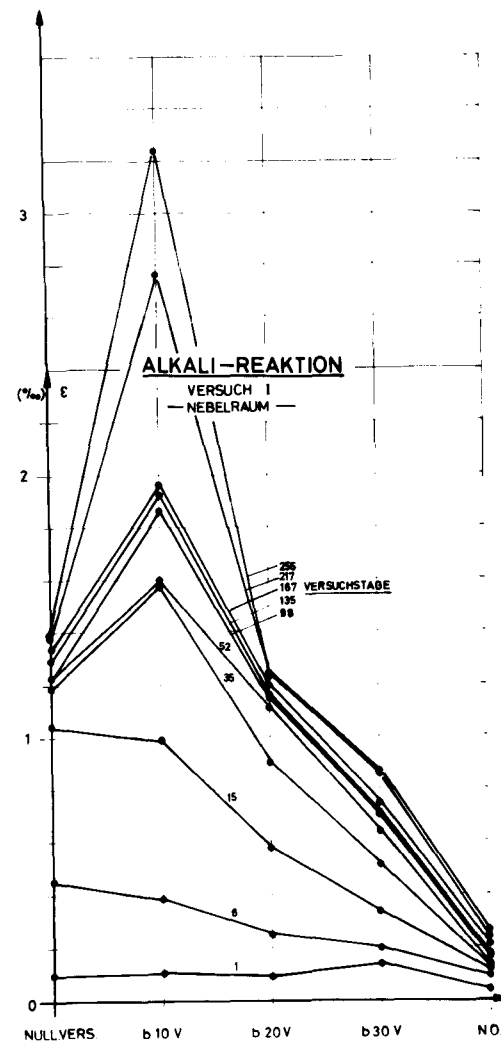


Bild 25: Längenänderung von Betonzylindern; Nebelkammer-lagerung; Nullversuch mit  $420 \text{ kg/m}^3$  Zement  
Betonzusatzstoff: "Veltheim-Füller"